

Eva HRUBEŠOVÁ¹, Barbara LUŇÁČKOVÁ²

**MODELOVÁNÍ DYNAMICKÝCH VLIVŮ ODSTŘELU NA NAPĚŤO-DEFORMAČNÍ STAV
SVAHOVÉHO TĚLESA**

Abstract

Software system Plaxis which is possible to be used for creation of computing models of seismic generation will be specified in this article. Principles of dynamic analysis can be divided into two basic types; the source of dynamic load is either one-point source of vibrations or an earthquake.

For an example the influence of quarry blasts (brown coal quarry in Northern Bohemia) was modelled with use of Plaxis system on stability and stress-deformation state of reverse slopes to define correlation with distances between the source of vibration and position of the slope. This problem was solved as an axially symmetric task. Reverse slopes are stable according to the model using dynamic load (coefficient of stability $F=1.4$). Parametric study enables us to evaluate influence of dynamic load depending on distances between the base of slope and the point of blast. In this case we documented that discussed distances do not have principal influence on the degree of slope stability but takes more significant effect on deformation situation in the slope.

Dependence of values of horizontal displacements in a point located 50 meters far from the hill (railway is situated here) on distance of vibration source and the base of slope will be demonstrated. This analysis is performed both with and without material absorption. Differences between finite values of horizontal displacements in these two models are minimal.

ÚVOD

Horninové prostředí a s ním spojené konstrukce bývají vystaveny nejen statickému zatížení, ale i zatížení dynamickému. Pro objektivní posouzení dynamické odezvy je třeba aplikovat výstižný výpočtový model, který by umožňoval kromě parametrů samotného dynamického zatížení zohlednit jak geologické a hydrogeologické poměry v dané oblasti a charakteristiky zeminového prostředí, tak i geometrické a materiálové charakteristiky uvažované konstrukce a její lokalizaci vzhledem ke zdroji dynamického zatížení. Často se úloha pro stanovení odezvy v důsledku dynamického zatížení převádí na situaci, v níž je vliv dynamického zatížení modelován náhradními statickými silami. Objektivněji je však možno dynamickou odezvu modelovat na základě přímé implementace parametrů dynamického zatížení (amplituda a frekvence kmitání, doba působení dynamického zatížení, zrychlení odpovídající dynamickému zatížení).

Dynamickou analýzu lze v zásadě rozdělit do dvou základních typů úloh, kdy zdrojem dynamického zatížení je buď omezený jednobodový zdroj vibrací nebo zemětřesení.

Problematika jednobodového zdroje je zpravidla modelována jako osově symetrická úloha, kde šíření vln probíhá analogicky jako v 3D systému. V takovém modelu dochází s rostoucí vzdáleností k rozptýlení energie vedoucí k utlumení vln (geometrické tlumení) a není tedy nutno zohledňovat materiálové tlumení.

Při modelování zemětřesení se dynamické zatížení zadává zpravidla na spodní část modelu, odkud se pak šíří směrem vzhůru. Tato problematika se řeší za podmínky rovinného přetvoření a v tomto případě je nutné definovat materiálové tlumení pomocí Rayleighových součinitelů.

¹ Doc. RNDr., PhD., VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební, L. Podestě 1875, Ostrava - Poruba, 708 33; eva.hrubesova@vsb.cz

² Ing., VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební, L. Podestě 1875, Ostrava - Poruba, 708 33; barbara.lunackova@vsb.cz

V současné době je k dispozici dostatečný počet programových výpočetních systémů, založených z velké části na metodě konečných prvků (např. PLAXIS, CESAR, ANSYS apod.), které umožňují modelovat dynamickou odezvu. Jednou ze základních problematických otázek modelování je však výstižnost numerického modelu. Mezi jeden z nejvýznamnějších faktorů ovlivňující výstižnost výsledků modelování dynamických vlivů patří spolehlivost a objektivita vstupních charakteristik modelu. Těmito charakteristikami jsou jak materiálové parametry horninového prostředí a konstrukčních prvků, tak i charakteristiky samotného dynamického zatížení. Materiálové charakteristiky konstrukčních prvků jsou obvykle s dostatečnou přesností známy, parametry horninového prostředí a charakteristiky dynamického zatížení však obvykle vykazují určitý náhodný (stochastický) charakter, který vyplývá především z komplikovanosti a proměnlivosti horninového prostředí a z objektivních i subjektivních nepřesností při stanovování parametrů dynamického zatížení. Jednou z možností zohlednění stochastického charakteru zmiňovaných vstupních charakteristik je využití simulačních stochastických metod modelování. Aplikace nejjednodušší simulační metody Monte Carlo však není v případě složitějších numerických modelů vzhledem k nutnosti realizace velkého množství simulačních výpočtů (řádově statisíce) příliš efektivní. S výhodou lze však v těchto numerických modelech využít simulační metodu Latin Hypercube Sampling (LHS), která redukuje počet požadovaných simulačních výpočtů (řádově desítky) při zachování potřebné přesnosti a vypovídací schopnosti simulačních výpočtů.

Podstatou generace touto simulační metodou je rozdělení oboru hodnot distribuční funkce náhodné vstupní veličiny X_j , $j=1, \dots, k$ na N intervalů se stejnou pravděpodobností $1/N$ (číslo N je rovno počtu dále provedených parametrických opakování výpočtů). Dále je proveden náhodný výběr čísla intervalu (výběr bez opakování) a hledaná generovaná realizace náhodné vstupní veličiny je pak rovna hodnotě inverzní distribuční funkce odpovídající středu náhodně vybraného intervalu.

Simulační metoda LHS byla aplikována při stochastickém modelování napětí-o-deformační odezvy svahového tělesa na dynamické zatížení odstřelem v povrchovém lomu. Základním deterministickým modelem byl numerický model založený na metodě konečných prvků vytvořený programovým systémem PLAXIS 2D a jeho nadstavbovým dynamickým modulem.

CHARAKTERISTIKA VÝPOČTOVÉHO MODELU A DYNAMICKÉHO ZATÍŽENÍ

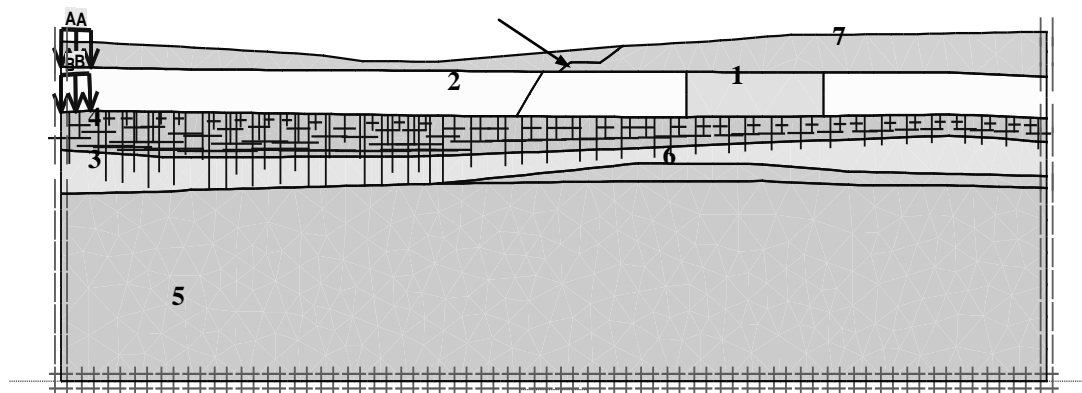
Konkrétním řešeným problémem je vliv plošného odstřelu v povrchovém lomu na napětí-o-deformační a stabilitní situaci závěrných svahů, a to především s ohledem na železnici, která je lokalizovaná ve vzdálenosti 50m od koruny závěrných svahů. Schéma modelu je patrné z obrázku č.1. Popisné, fyzikální a mechanické vlastnosti horninového prostředí jsou uvedeny v tab. č. 1.

V základní modelové studii byla provedena parametrická analýza, v níž byl sledován vývoj stabilitního [2] a napětí-o-deformačního stavu modelu v závislosti na vzdálenosti výbuchu od paty závěrného svahu. Ve výchozí situaci byl odstřel lokalizován 480m od paty svahu, ten se pak v modelu přibližoval (po 50m) směrem k patě svahu.

V modelu byly uvažovány 2 základní výpočtové varianty (etapy):

- ☐ odstřel byl proveden na hlavě sloje po 1. etapě realizace závěrných svahů (pata dílčího závěrného svahu je na úrovni hlavy sloje),
- ☐ odstřel byl proveden na patě sloje po 2. etapě realizace závěrných svahů (pata závěrného svahu je na úrovni paty sloje).

Linie závěrných svahů



Obr.1 Schéma modelu se znázorněním linií závěrných svahů a primárních pórových tlaků

Dynamická analýza v aplikovaném dynamickém modulu programového systému PLAXIS vychází z Newtonova pohybového zákona $F = m \cdot a$, [1]. Základní rovnice pro výpočet časově závislých objemových změn pod vlivem dynamického zatížení je v programu PLAXIS definována pomocí maticového zápisu pro celou uvažovanou oblast takto:

$$M \ddot{e} + C \dot{e} + K e = F, \quad (1)$$

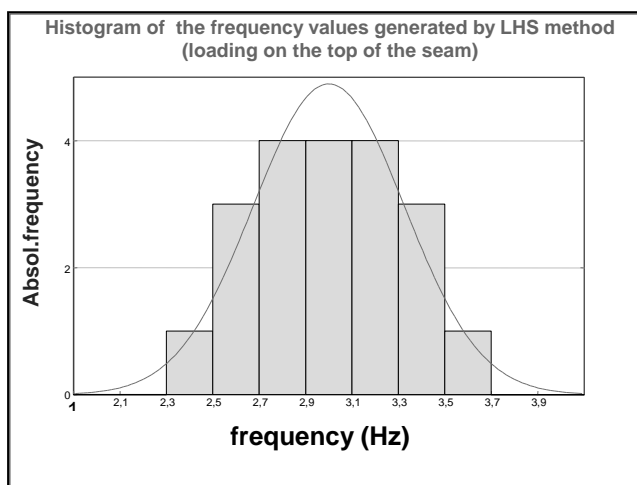
kde M = hmotnostní matice, e = vektor posunů, C = matice tlumení, K = matice tuhosti, F = vektor zatížení. Posuny e , rychlost \dot{e} a zrychlení \ddot{e} jsou časově závislé proměnné. Matice C reprezentuje materiálové tlumení, které je definováno pomocí Rayleighových součinitelů tlumení α_R a β_R .

K modelování této úlohy byl použit osově symetrický model, kde šíření vln probíhá analogicky jako v 3D systému a není tedy nutno zadávat charakteristiky materiálového tlumení. Pro ověření tohoto faktu byla celá situace modelována jak bez uvažování materiálového tlumení (Rayleighovy parametry tlumení byly rovny nule), tak i se zohledněním materiálového tlumení ($\alpha_R = \beta_R = 0,001$). Výsledky tohoto srovnání byly publikovány v [2].

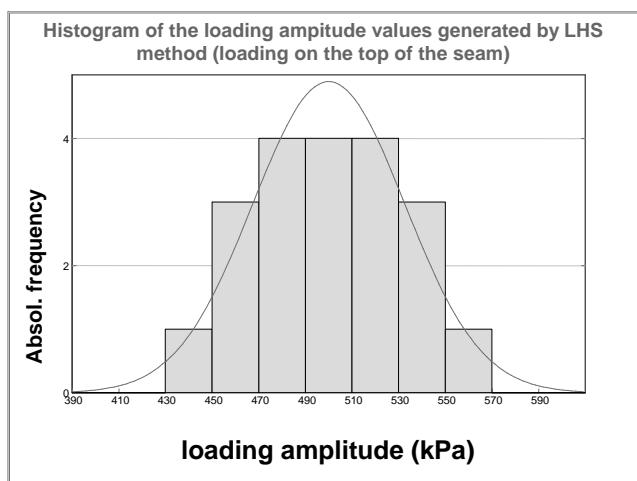
Tab.1 Parametry zemin v analyzovaném závěrném svahu

Mohr-Coulomb,	γ_{unsat} [kNm ⁻³]	γ_{sat} [kNm ⁻³]	k_x [m/den]	k_y [m/den]	ν	E_{ref} [kNm ⁻²]	c_{ref} [kNm ⁻²]	φ [°]
1) Stařiny	8	11,5	8,64E-1	8,64E-1	0,3	5E3	5	26
2) Sloj	11	13,5	8,64	8,64	0,3	5E4	35	25
3) Vulkanogenní horniny	19,5	21,5	8,64E-4	8,64E-4	0,3	1,5E5	70	25
4) Podložní souvrvství	20	22	8,64E-4	8,64E-4	0,3	1,5E5	70	23
5) Rula	20	22	8,64E-5	8,64E-5	0,3	3E6	300	40
6) Rula kaolinická	20	22	8,64E-4	8,64E-4	0,3	1,5E5	70	25
7) Nadloží svrchní	17,5	18,5	8,64E-2	8,64E-2	0,3	5,6E4	20	12

Dynamický modul programového systému Plaxis vyžaduje pro charakterizaci dynamického zatížení zadání amplitudy dynamického zatížení, jeho frekvence, rozsahu oblastí, na niž je uvažované dynamické zatížení primárně aktivováno, a času, po který toto zatížení působí. Rozsah aktivací oblastí dynamického zatížení odpovídal oblastí plošného odstřelu a byl uvažován 60m, doba působení dynamického zatížení byla 2s. Amplituda dynamického zatížení a jeho frekvence byly v modelu považovány za stochastické náhodné veličiny, řídicí se normálním rozdělením pravděpodobnosti. Parametry normálního rozdělení vyplynuly z naměřeného rozsahu frekvencí 2 - 4 Hz (Kaláb, [3]) a z uvažovaného rozsahu amplitud dynamického zatížení (100 - 300 kPa na hlavě sloje, 400 - 600 kPa na patě sloje). Rozdělení pravděpodobnosti hodnot frekvence je charakterizováno normálním rozdělením pravděpodobnosti se střední hodnotou μ a rozptylem σ^2 , tj. $N(\mu, \sigma^2) = N(3, 0.1089)$, amplituda na hlavě sloje pak normálním rozdělením pravděpodobnosti $N(200, 1089)$, amplituda na patě sloje rozdělením $N(500, 1089)$. Metodou LHS bylo pro každý stochastický parametr generováno 20 hodnot, histogramy absolutních četností generovaných hodnot frekvencí a amplitud pro zatížení iniciované na hlavě sloje jsou ilustrovány na obrázcích č. 2 a č. 3.



Obr.2 Histogram frekvencí generovaných metodou LHS pro zatížení iniciované na hlavě sloje

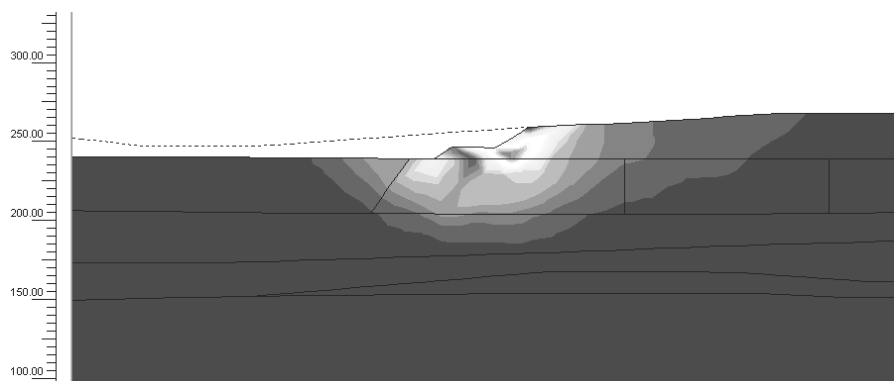


Obr.3 Histogram amplitud generovaných metodou LHS pro zatížení iniciované na hlavě sloje

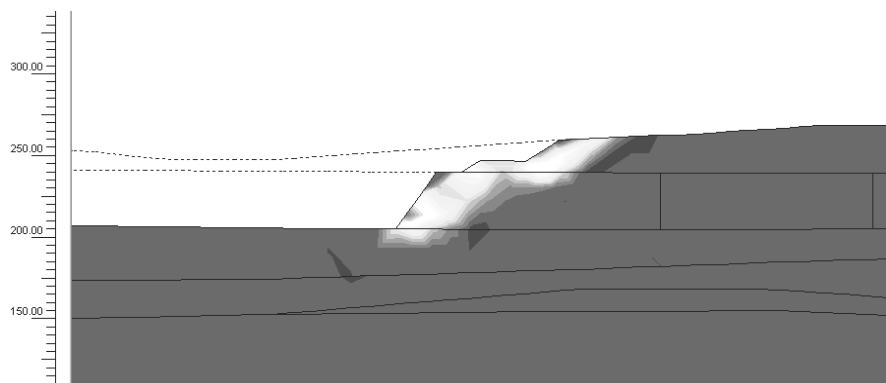
S generovanými hodnotami frekvence a amplitudy zatížení bylo realizováno 20 parametrických výpočtů pro vyhodnocení deformační a stabilitní odezvy uvažovaného svahového tělesa. Následným vyhodnocením základních statistických charakteristik získaných souborů výsledků - středních hodnot, rozptýlů a příslušných kvantilů $\alpha_{0,05}$ a $\alpha_{0,95}$ byly stanoveny grafy, ilustrující v jakém rozmezí se s 90% pravděpodobností pohybují hodnoty odpovídajících horizontálních a vertikálních posunů v místě trati.

VÝSLEDKY MODELOVÉHO ŘEŠENÍ

Výsledky modelových výpočtů neprokázaly výrazný vliv variability charakteristik dynamického zatížení na stabilitu svahového tělesa (rozdíly v řádech setin). Hodnota stupně stability ve výpočtu neklesla pod hodnotu 1,3. Provedením parametrické analýzy vlivu trhacích prací na stabilitní situaci v závislosti na vzdálenosti trhacích prací od paty svahu a na variabilitě stochastických parametrů odstřelu se prokázala jen nepatrná změna v hodnotách stupně stability. Výchozímu stavu, kdy byl výbuch vzdálen od paty svahu 480m, odpovídal stupeň stability $M_{sf} = 1,4$, druhé etapě $M_{sf} = 1,34$. Pro názornost je na obrázcích č. 4 a č. 5 ukázán průběh potenciálních smykových ploch odpovídající výchozí situaci.

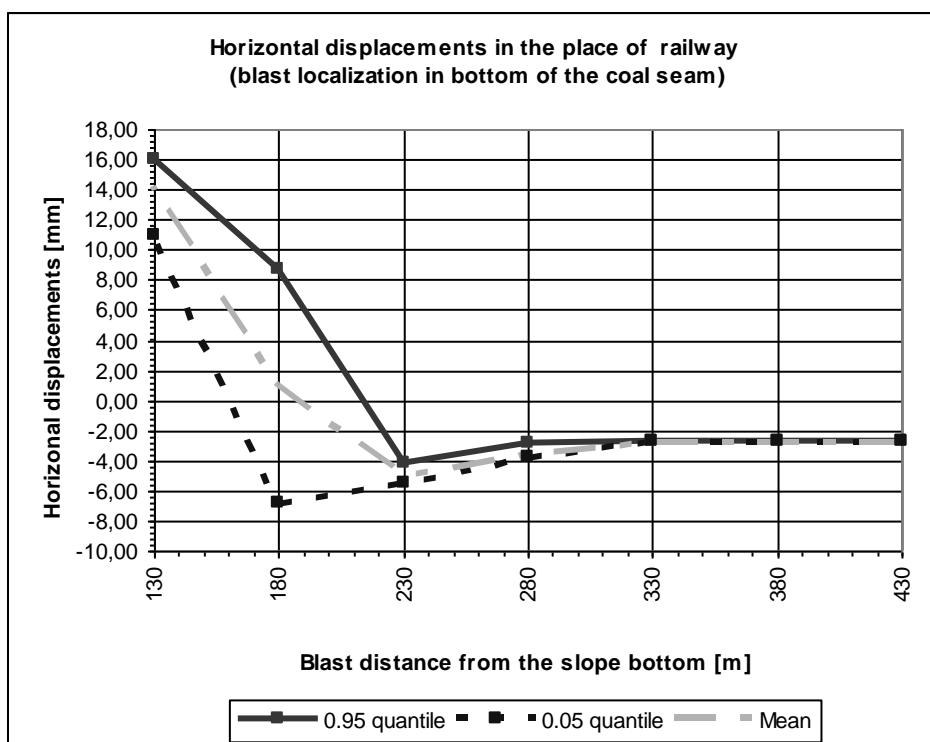


Obr.4 Tvar potenciálních smykových ploch v 1. etapě (výchozí situace)

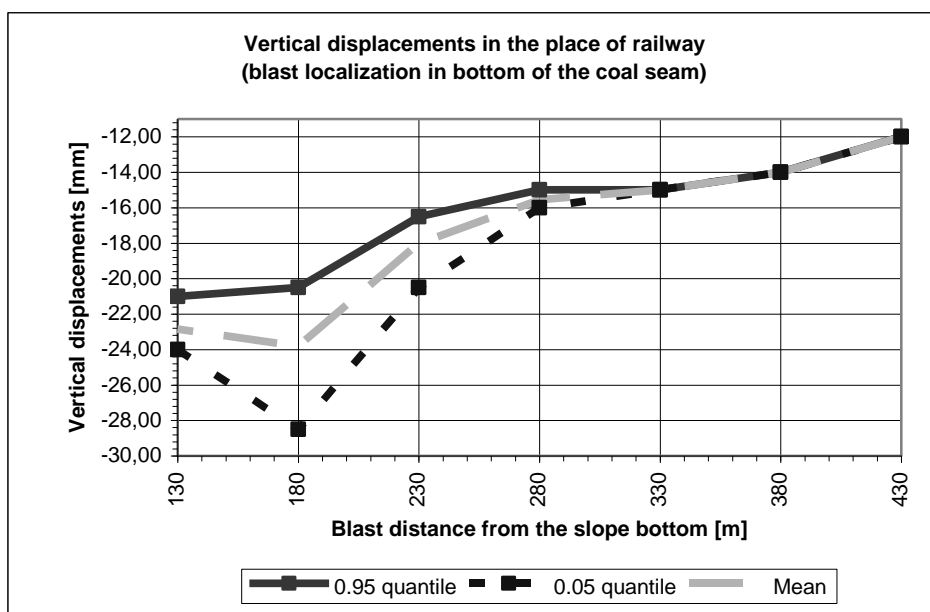


Obr.5 Tvar potenciálních smykových ploch v 2. etapě (výchozí situace)

Výrazněji se vliv trhacích prací projevil na napěťo-deformačním stavu závěrného svahu. Výsledky stochastického modelování pro variantu odstřelu v patě sloje jsou ilustrovány na obr. č 6 a č. 7.



Obr.6 Horizontální posuny v místě železnice odpovídající druhé etapě realizace odstřelu



Obr.7 Vertikální posuny v místě železnice odpovídající druhé etapě realizace odstřelu

ZÁVĚR

Příspěvek ukázal některé možnosti matematického modelování dynamických úloh za předpokladu stochastického charakteru vybraných parametrů dynamického zatížení.

S použitím osově symetrického modelu dynamického modulu programu PLAXIS a s využitím simulační stochastické metody LHS byla řešena otázka vlivu plošného odstřelu povrchového lomu na napěťo-deformační a stabilitní stav závěrného svahu. Modelová parametrická analýza ukázala, že se v daném případě vliv dynamického zatížení projevil na stabilitě závěrného svahu pouze nepatrně. Markantnější projev trhacích prací se prokázal na deformačním stavu závěrného svahu, přičemž větších hodnot posunů bylo dosaženo při trhacích pracích v 2. etapě realizace závěrných svahů. V souladu s předpoklady se hodnoty horizontálních i vertikálních posunů zvyšovaly s klesající vzdáleností místa odstřelu od paty svahu. Ze statistického vyhodnocení středních hodnot a příslušných kvantilů plyne, že do vzdálenosti větší než 280 m od paty sloje se vliv variability charakteristik dynamického zatížení prakticky neprojevuje, s přibližováním se k patě svahu je vliv variability výraznější. Rozsahy vertikálních a horizontálních posunů v místě železnice, které jsou určeny statistickým vyhodnocením příslušných kvantilů za předpokladu stochastického charakteru frekvence a amplitudy dynamického zatížení, udává následující tabulka č. 2.

Tab.2 Rozsahy vertikálních a horizontálních posunů v místě železnice (s 90 % pravděpodobností)

vzdálenost odstřelu od paty záv. svahu (m)	280		230		180		130	
lokalizace odstřelu	hlava sloje	pata sloje	hlava sloje	pata sloje	hlava sloje	pata sloje	hlava sloje	pata sloje
horizontální posun (mm) s 90% pravděpodobností	<2,1,2,2>	<-3,8, -2,8>	<-3,5,-1,9>	<-5,5,-4,1>	<-5,3,8>	<-6,8,8,7>	<4,8,14>	<11,16>
vertikální posun (mm) s 90% pravděpodobností	<-12,-12>	<-16,-15>	<-12,5,-11,5>	<-20,5,-16,5>	<-15,5,-12>	<-28,5,-20,5>	<-18,-13,5>	<-24,-21>

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt IM6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

LITERATURA

- [1] Manuál programu PLAXIS 2D – verze 8.
- [2] LUŇÁČKOVÁ, B. Vliv plošného odstřelu na napěťo-deformační a stabilitní stav svahu. In Sborník Juniorstav 2006. Brno : VUT Brno, 2006. vol. 8, s. 121.
- [3] KALÁB, Z. (2003): Seizmické projevy trhacích prací na Chomutovsku. Zkrácená verze habilitační práce. Vědecké publikace fakulty stavební VŠB – Technické univerzity Ostrava, ISSN 1213-7456, ISBN 80-248-0235-X, 38 stran.

Reviewer: Ing. Jaromír Knejzlík, CSc., Ústav geoniky AVČR

